$NaHCO_3$ 胁迫对紫根水葫芦形态学指标和光合参数的影响

程贝贝，陈胜艳，岳莉然*

（东北林业大学，哈尔滨 150040)

摘要：为了研究 $NaHCO_3$ 胁迫对紫根水葫芦的形态学指标及光合参数等的影响，为紫根水葫芦在碱性水体中的应用及改善水体盐碱化提供理论支持，该文以紫根水葫芦为材料，采用不同浓度碱性盐 $NaHCO_3$ 溶液处理成株紫根水葫芦，测定在 $NaHCO_3$ 胁迫下紫根水葫芦的植株株高、根长、根冠比、生物量、含水量和光合参数（净光合速率(Pn)、胞间 CO_2 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)）。结果表明，紫根水葫芦在 20 mmol·L^{-1} $NaHCO_3$ 浓度下的水溶液 pH 值最为平缓；在低浓度 $NaHCO_3$ 溶液中(≤40 mmol·L^{-1})，相比 CK，紫根水葫芦的形态学指标呈现增长或无显著影响情况，而在高浓度 $NaHCO_3$ 溶液中(≥60 mmol·L^{-1})，随着 $NaHCO_3$ 浓度的升高，紫根水葫芦形态学指标显著降低，且与 $NaHCO_3$ 浓度呈负相关；$NaHCO_3$ 胁迫对紫根水葫芦的光合参数影响显著，随着 $NaHCO_3$ 浓度的增加及试验处理时间的延长，紫根水葫芦的 Pn 呈持续下降的趋势，Ci、Tr 和 Gs 整体呈上升趋势，其光合作用主要受到的是非气孔限制。综合分析，紫根水葫芦具有一定的耐 $NaHCO_3$ 能力，能正常生存在不超过 40 mmol·L^{-1} $NaHCO_3$ 浓度的水体中，且能改善低 $NaHCO_3$ 浓度下的水体 pH 值。

关键词：$NaHCO_3$ 胁迫，紫根水葫芦，形态学指标，光合参数

chinaXiv:202003.00017v1

Effects of naHCO₃ Stress on morphological indices and photosynthetic parameter of purple root *Eichhornia crassipes*

Cheng Beibei, Chen Shengyan, Yue Liran[1*]

(*Northeast Forestry University*, Harbin, 150040, China)

Abstract: In order to study the effects of $NaHCO_3$ stress on the morphological indexes and photosynthetic parameters of purple root *Eichhornia crassipes*, and to provide theoretical support for the application of purple root *Eichhornia crassipes* in alkaline water and to improve the salinization of water, this article used purple root *Eichhornia crassipes* as material, we treated the adult purple root *Eichhornia crassipes* with different concentrations of the alkaline salt $NaHCO_3$ solution, and determined the morphological indicators of the purple root *Eichhornia crassipes* under different concentrations of the alkaline salt $NaHCO_3$ stress, including plant height, root length, root-shoot ratio, biomass, water content, and photosynthetic parameters of purple root *Eichhornia crassipes* under different concentrations of the alkaline salt $NaHCO_3$ stress, including net photosynthetic rate (Pn), intercellular CO_2 concentration (Ci), transpiration rate (Tr) and stomatal conductance (Gs). The results showed that the pH value of the water solution of the purple root *Eichhornia crassipes* at 20 mmol·L^{-1} $NaHCO_3$ concentration is the most gentle; in low concentration alkaline salt $NaHCO_3$ solution (≤40 mmol·L^{-1}), compared with CK, the morphological index of the purple root *Eichhornia crassipes* showed an increase or no significant effect, while in high concentration alkaline salt $NaHCO_3$ solution (≥60 mmol·L^{-1}), with the increase of $NaHCO_3$ concentration, the morphological index of the purple root *Eichhornia crassipes* decreased significantly, and there was a negative correlation with the concentration of $NaHCO_3$; $NaHCO_3$ stress has a significant effect on the photosynthetic parameters of the purple root *Eichhornia crassipes*, with the increase of the alkaline salt $NaHCO_3$ concentration and the extension of experimental treatment time, the Pn of the purple root *Eichhornia crassipes* has

---

基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2572014BA22) [Supported by Special Funds for Basic Scientific Research Business Expenses of Central Universities (2572014BA22)]。

作者简介：程贝贝（1994-），女，河南省唐河县人，硕士研究生，主要从事园林植物资源与应用的研究，(E-mail) bbc_hnts@163.com。

*通信作者：岳莉然（1978-），副教授，硕士研究生导师，现主要从事园林植物资源与应用等相关研究，(E-mail) ms_yueliran@163.com。

a continuously decrease trend, and Ci, Tr, and Gs generally has a continuously increase trend, and non-stomatal restriction is the main way to restrict photosynthesis in the purple root *Eichhornia crassipes*. Comprehensive analysis shows that the purple root *Eichhornia crassipes* has a certain resistance to $NaHCO_3$, and the purple root *Eichhornia crassipes* can normally survive in water environment with an alkali concentration of no more than 40 mmol ·L^{-1} $NaHCO_3$, and the purple root *Eichhornia crassipes* can improve the pH value of water bodies in the low alkaline salt $NaHCO_3$ concentrations.

Key words: $NaHCO_3$ stress， purple root *Eichhornia crassipes*，morphological indices，photosynthetic parameter

土壤盐渍化已经成为世界性环境问题。不同地域盐碱地所含盐类型不同，主要包括 $NaSO_4$、NaCl、$NaCO_3$、$NaHCO_3$、以及钙盐和镁盐等，而苏打盐碱土主要盐成分以 $NaCO_3$ 和 $NaHCO_3$ 为主（石伟，2011）。松辽平原西部是我国土壤盐渍化最集中的分布区，在松辽平原的盐渍土的表层土壤中，阳离子含量主要以 Na^+为主，占阳离子总量 71.18%，阴离子则以 HCO_3^-、CO_3^{2-}为主，占阴离子总量的 74.27%（吴春阳，2012）。同时，盐化作用是影响和控制水体环境的重要因素，干旱半干旱地区天然水体盐化作用在世界范围内引起了重大关注（Sunil Mehta et al., 2000）。根据盐碱土水盐迁移规律，虽水体矿化度不同，盐分中的主要离子都为 Na^+及 HCO_3^-、CO_3^{2-}（许艳争，2008）。有研究表明，地下水的盐化作用过程，不仅与蒸发作用有关，更主要取决于水—土相互作用（章光新等，2005）。通过引进、筛选、培育耐盐碱水体的植物，恢复水域植被，减少水体盐化程度，反馈机制改善土壤理化性质，可达到改良利用抑制水体及土壤盐碱化的作用和效果。因此，通过挑选培育能净化水体、耐碱性盐 $NaHCO_3$ 的植物品种等生物手段控制水体盐化作用和盐化范围，从而达到改善环境、改良水体周围土质的效果不失为一举两得的办法。

紫根水葫芦（城乡致富，2009）全称巨紫根小柄叶水葫芦，是云南省生态农业研究所在普通水葫芦的基础上，用作物基因表型诱导调控表达（GPIT）技术培育成功的新种质材料（黄汗青，2015）。紫根水葫芦具有比普通水葫芦更强的净化水质的优点，同时克服了普通水葫芦的疯长、易腐烂、耗氧多等缺点（黄汗青，2015）。近几年来，紫根水葫芦在水生态环境修复中应用越来越广泛，逐渐体现其高效快速修复水环境，不造成二次污染等优势（陈松，2018；陈文萍等，2016；卢秀云，2016；展巨宏等，2014）。

全球盐渍土地面积约 10 亿 hm^2，中国盐渍化土地面积约 3 460 万 hm^2（谢振宇和杨光穗，2003），其中东南部的沿海地区、东北地区的松嫩平原和西北地区是主要的盐渍土分布区域（柴民伟，2013）。与此同时，通过盐化作用，盐渍土分布区域的河流水体生态环境也遭到不同程度的盐碱破坏。本文利用紫根水葫芦强大的净化水质能力和适应性强的特性开展研究，在 $NaHCO_3$ 胁迫下，记录研究紫根水葫芦的生长情况，为碱水体种植，改善水体盐化作用，调节水—土平衡提供理论依据打下坚实基础。

1 材料与方法

1.1 紫根水葫芦的 $NaHCO_3$ 胁迫试验设计

2018 年 5 月将从浙江金华水生植物基地购得的全部紫根水葫芦植株表面泥土、杂草等冲洗干净并摘除严重损坏和腐烂的叶子后，放入事先准备好的 24 个长宽高分别为 66cm*45cm*47cm、装有三分之二清水的塑料敞口的水生种植箱中，缓苗 7 天后，选取生长健壮、大小均一的紫根水葫芦植株作为胁迫处理材料，设置 0 mmol·L^{-1}（空白对照 CK）、20 、40 、60 、80 、100 mmol·L^{-1} 等 6 个浓度的 $NaHCO_3$ 溶液梯度，每个浓度梯度设置 3 个重复，每个重复 30 株紫根水葫芦。试验在东北林业大学苗圃基地内进行，保证温度、湿度、光照等外界因素一致，植株放到大小一致的水生种植箱中。试验开始后，每天在北京时间 17：00 取水样监测 pH 值变化，每隔 3 天取各个 $NaHCO_3$ 水溶液浓度梯度的 3 株植株进行单株拍照，观测其生长情况。同时，每隔 3 天从每个 $NaHCO_3$ 水溶液浓度梯度中选取 3 株紫根水葫芦植株用于形态学指标和光合参数的测定。试验期间进行正常病虫害防治等苗期管理。

1.2 测量指标及方法

1.2.1 株高和根长的测定

胁迫试验开始后的第 3、6、9、12、15 和 18 天从每个 $NaHCO_3$ 水溶液浓度梯度中选取 3 株紫根水葫芦植株，用装有冰袋的泡沫盒将其从苗圃保存运输至实验室后，逐一将根部洗净后再用蒸馏水冲洗干净，用专用吸水滤纸将植株整株表面水分吸干，用钢尺分别测量其株高和根长。

$NaHCO_3$ 对株高生长或根长生长的相对影响计算在参照孙延爽等（2017）方法的基础上作出改进：

$NaHCO_3$ 对株高生长的相对影响=（胁迫后株高-非胁迫条件下株高）/非胁迫条件下株高 × 100%；

$NaHCO_3$ 对根长生长的相对影响=（胁迫后根长-非胁迫条件下根长）/非胁迫条件下根长 × 100%；

chinaXiv:202003.00017v1

1.2.2 根冠比及含水量的测定

在测量株高及根长后将植株按照浓度梯度分开称取水上和水下两部分鲜重后包装，并置于 105 ℃的烘箱中杀青 30 min，然后在 70 ℃下烘干至恒重，称取干重。

总生物量=水上生物量+水下生物量（韩静丽等，2019）；

根冠比=水下生物量/水上生物量（韩静丽等，2019）；

叶片含水量=（水上鲜重-水上干重）/水上鲜重× 100%（吾木提・艾山江等，2019）；

根茎含水量=（水下鲜重-水下干重）/水下鲜重× 100%。

耐 $NaHCO_3$ 系数（ω）在参照李影和王友保（2010）方法的基础上作出改进：

耐 $NaHCO_3$ 系数（ω）=不同浓度处理下的平均测定值/对照测定值。

1.2.3 叶片光合参数的测定

采用 LI-6400 便携式光合作用测定系统，在试验开始后的第 2 天测定 CK 的光响应曲线，采用封闭式气路，利用 CO_2 小钢瓶维持气体平衡，LI-6400 的红蓝光源模拟设定光强依次为 1 800，1 600，1 400，1 200，1 000，800，600，400，200，100，50，25，0 μmoL・m^{-2}・S^{-1}，机器自动记录净光合速率(Pn)、胞间 CO_2 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)和气孔导度(Gs)等参数，得到紫根水葫芦植株的最适光强，之后分别于试验开始后的第 3、6、9、12、15、18 天北京时间上午 09: 00-11: 30 采用 LI-6400 便携式光合仪开放式气路，大气的 CO_2 浓度保持在 400-420 mmol・mol^{-1}，在紫根水葫芦植株最适光强下测定净光合速率(Pn)、胞间 CO_2 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)和气孔导度(Gs)等参数。每个 $NaHCO_3$ 处理随机选择 3 株，每株选取长势和光照相似部位的一片功能叶（从顶部向下第三片功能叶），每片叶测 3 次，取平均值。

1.3 数据处理

用 SPSS 统计软件对数据进行方差分析，Duncan 法进行不同数据组间差异的分析，并运用 Excel 软件对试验数据进行数据统计和图表绘制。

2 结果与分析

2.1 $NaHCO_3$ 胁迫对紫根水葫芦高生长与根生长的影响

由表 1 可知，在 20 mmol・L^{-1} $NaHCO_3$ 胁迫浓度时，相较于 CK，紫根水葫芦高生长增加了 13.36%，根生长增加了 31.97%。同时，在 40、60 mmol・L^{-1} 浓度条件下，根生长分别增长了 46.10%、15.24%。说明在 20 mmol・L^{-1} 浓度下促进了紫根水葫芦株高的生长，在 20、40、60 mmol・L^{-1} 浓度下促进了紫根水葫芦根的生长。40、60、80、100 mmol・L^{-1} 浓度对高生长影响均呈负值且一直下降，说明均抑制紫根水葫芦高生长，较 CK 分别下降了 7.66%、42.04%、52.87%、53.51%。80、100 mmol・L^{-1} 浓度对根生长影响呈负增长，说明抑制紫根水葫芦根生长，较 CK 分别下降了 14.13%、15.24%。随着 $NaHCO_3$ 胁迫处理时间的增加，紫根水葫芦的平均株高呈现先增加后降低的趋势，原因是随着时间的推移，叶子在胁迫下生长一段时间后萎蔫脱落。而紫根水葫芦的平均根长随着时间的推移整体大致呈现降低的趋势，原因是在胁迫初期紫根水葫芦老根先脱落，又长出新根，最后根持续脱落。

表 1 不同 $NaHCO_3$ 胁迫浓度在不同处理时间的高生长及根生长影响

Table 1 Effects of $NaHCO_3$ stress concentration on high growth and root growth at different treatment time

处理 Treatment		3	6	9	12	15	18	$NaHCO_3$ 对高生长或根生长的影响 Effect of $NaHCO_3$ on Plant Height Growth or Root Growth (%)
		天数 Day (d)						
株高 Plant height (cm)	CK	4.83±0.17ab	5.33±0.44ab	4.00±0.50b	3.83±0.33ab	3.33±0.17b	4.83±0.44a	0
	20 mmol・L^{-1}	4.33±0.67ab	4.67±0.17b	6.17±0.44a	5.17±0.60a	4.00±1.04ab	5.33±1.83a	13.36
	40 mmol・L^{-1}	3.83±0.60ab	3.67±0.44cd	5.17±0.60ab	4.50±0.76ab	5.00±0.58a	2.00±0.58b	-7.66
	60 mmol・L^{-1}	3.33±0.33b	4.50±0.29bc	4.00±0.00b	3.33±0.33b	0.00±0.00c	0.00±0.00b	-42.04
	80 mmol・L^{-1}	5.33±0.88a	3.50±0.17d	2.50±0.29c	1.00±0.00c	0.00±0.00c	0.00±0.00b	-52.87
	100 mmol・L^{-1}	4.33±0.33ab	6.00±0.00a	1.33±0.17c	0.50±0.00c	0.00±0.00c	0.00±0.00b	-53.51
	平均 Mean	4.33±0.25	4.61±0.25	3.86±0.41	3.06±0.45	2.06±0.54	2.03±0.62	

chinaXiv:202003.00017v1

ChinaXiv合作期刊

根长 Root length (cm)	CK	5.50±0.29b	6.00±0.00b	5.67±0.73d	9.67±1.36ab	8.00±0.50a	10.00±0.58a	0
	20 mmol • L^{-1}	8.67±0.88b	9.50±1.15ab	9.00±0.58bc	11.83±1.17a	10.17±1.30a	10.00±2.08a	31.97
	40 mmol • L^{-1}	12.50±6.25ab	13.17±4.04a	10.17±1.59b	11.33±1.33a	10.00±1.15a	8.33±1.76a	46.10
	60 mmol • L^{-1}	14.67±2.19ab	9.67±0.44ab	15.67±0.33a	11.67±2.73a	0.00±0.00b	0.00±0.00b	15.24
	80 mmol • L^{-1}	10.67±2.91ab	7.50±1.26ab	10.67±1.01b	9.67±1.20ab	0.00±0.00b	0.00±0.00b	-14.13
	100 mmol • L^{-1}	18.33±0.88a	7.67±0.17ab	6.33±0.33cd	6.00±0.58b	0.00±0.00b	0.00±0.00b	-15.24
	平均 Mean	11.72±1.53	8.92±0.83	9.58±0.85	10.03±0.72	4.69±1.18	4.72±1.22	

注: 数值=均值±标准误差。同列不同小写字母表示同一指标不同 $NaHCO_3$ 处理间差异显著(P<0. 05)。下同。Note: Data = means ± standard error．Different lower-case letters in same column mean significant difference among concentrations of $NaHCO_3$ within the same index (P<0. 05). The same below.

2.2 $NaHCO_3$ 胁迫对紫根水葫芦根冠比及含水量的影响

由表 2 可知，$NaHCO_3$ 浓度为 20 和 40 mmol • L^{-1} 时，紫根水葫芦的总生物量、根冠比、叶片含水量和根茎含水量的耐 $NaHCO_3$ 系数(ω)均大于或等于 CK，较 CK 分别增加了 0.99、0.33、0.01、0.00 和 0.90、0.13、0.01、0.00。在 60、80 和 100 mmol • L^{-1} 时，紫根水葫芦的总生物量、根冠比、叶片含水量和根茎含水量的耐 $NaHCO_3$ 系数(ω)均小于 CK 且持续下降。表明随着 $NaHCO_3$ 浓度的增加，紫根水葫芦的总生物量、根冠比、叶片含水量和根茎含水量的耐 $NaHCO_3$ 系数(ω)持续降低，呈负相关关系。随着 $NaHCO_3$ 处理时间的增加，总生物量和根冠比趋势与上述根生长的趋势一致，叶片含水量和根茎含水量的趋势与上述高生长的趋势一致。表明数据符合紫根水葫芦的生理特性与走向。

2.3 $NaHCO_3$ 胁迫对紫根水葫芦光合参数的影响

由图 1 可知，紫根水葫芦的净光合速率(Pn)、胞间 CO_2 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)和气孔导度(Gs)随着光强的递增均大致呈对数增长的趋势，其中在光强 1 400 μmol • m^{-2} • S^{-1} 时净光合速率(Pn)最大，为 19.2 μmol •m^{-2} •S^{-1}，因此选取 1 400 μmol •m^{-2} •S^{-1} 作为紫根水葫芦植株的最适光强。用最适光强在不同 $NaHCO_3$ 胁迫处理下测定紫根水葫芦叶片的光合特性，对所得结果用 SPSS 进行方差显著性分析和用 Excel 进行了数据处理整合及图表制作，结果见图 2，$NaHCO_3$ 胁迫对紫根水葫芦的 Pn、Ci、Tr 和 Gs 的影响显著($P<0.05$)。与 CK 相比，$NaHCO_3$ 胁迫下的 Pn 都低于 CK 的 Pn。20 和 40 mmol • L^{-1} 浓度下的 Pn 随着时间的推移先下降后缓慢上升之后陡然下降，最高值在第 6 天，较 CK 分别下降了 23.64%和 29.70%。而 60、80 和 100 mmol • L^{-1} 浓度下的 Pn 随着时间的推移一直下降，直到植株失去光合作用，只剩下暗呼吸。表明紫根水葫芦在低 $NaHCO_3$ 浓度胁迫时能适应，但是随着胁迫时间增加或是在高 $NaHCO_3$ 浓度胁迫时，胁迫累积到达一定程度时，植株受到不可逆伤害。

与 CK 相比，$NaHCO_3$ 胁迫下的 Ci、Tr 和 Gs 整体呈上升趋势。20、40、60、80 和 100 mmol • L^{-1} 最高值较 CK 分别增加了 27.57%、27.57%、46.69%、50.37%、52.21%，86.46%、87.81%、103.09%、143.71%、145.65%和 17.83%、57.36%、133.73%、173.49%、181.84%。表明紫根水葫芦随着 $NaHCO_3$ 胁迫浓度的加深，C_i、T_r 和 G_s 的最高值也持续增加，表明紫根水葫芦主要受到光合作用的非气孔限制。

表 2 $NaHCO_3$ 胁迫对总生物量、根冠比、叶片含水量和根茎含水量的影响

Tab.2 Effects of $NaHCO_3$ stress on total biomass, root-shoot ratio, leaf water content and rhizome water content

	处理 Treatment	3	6	9	12	15	18	ω
		天数 Day (d)						
总生物量 Total biomass (g)	CK	8.04±0.29e	7.63±0.44d	12.16±1.00f	18.59±1.17c	17.53±0.33b	24.37±0.37c	1.00
	20 mmol·L^{-1}	27.76±0.33a	27.27±0.22a	27.57±0.17b	33.89±0.93a	30.65±0.88a	28.44±0.50b	1.99
	40 mmol·L^{-1}	19.86±0.60d	19.67±0.00b	31.22±0.60a	33.07±0.60a	31.82±0.88a	32.38±0.33a	1.90
	60 mmol·L^{-1}	20.38±0.33d	18.29±0.33bc	19.27±0.38d	21.58±0.76b	0.00±0.00c	0.00±0.00d	0.90
	80 mmol·L^{-1}	22.49±0.58c	17.80±0.60c	17.25±0.73e	15.36±0.73d	0.00±0.00c	0.00±0.00d	0.83
	100 mmol·L^{-1}	24.91±0.00b	16.64±1.01c	21.87±0.93c	7.42±0.39e	0.00±0.00c	0.00±0.00d	0.80
	平均 Mean	20.57±0.73	17.89±0.87	21.56±0.33	21.65±1.36	13.33±0.67	14.20±0.48	

chinaXiv:202003.00017v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202003.00017v1

根冠比 Root-shoot ratio	CK	1.07	1.02	1.09	1.37	1.22	1.72	1.00
	20 mmol·L-1	2.27	1.93	2.46	1.35	1.08	0.85	1.33
	40 mmol·L-1	2.06	1.30	2.09	0.99	1.08	0.92	1.13
	60 mmol·L-1	1.99	1.58	1.56	1.55	0.00	0.00	0.89
	80 mmol·L-1	1.55	1.43	1.12	1.32	0.00	0.00	0.72
	100 mmol·L-1	1.24	1.06	0.68	0.84	0.00	0.00	0.51
	平均 Mean	1.70	1.39	1.50	1.24	0.56	0.58	
叶片含水量 Leaf water content (%)	CK	91.26	91.71	91.73	93.64	92.19	95.20	1.00
	20 mmol·L-1	92.73	91.63	93.15	94.01	95.36	94.73	1.01
	40 mmol·L-1	91.47	91.65	93.80	94.73	94.86	96.41	1.01
	60 mmol·L-1	91.55	92.50	93.55	94.61	0.00	0.00	0.67
	80 mmol·L-1	91.28	93.92	93.50	93.93	0.00	0.00	0.67
	100 mmol·L-1	91.91	92.31	94.15	88.76	0.00	0.00	0.66
	平均 Mean	91.70	92.29	93.31	93.28	47.07	47.72	
根茎含水量 Rhizome water content (%)	CK	91.73	92.72	92.81	94.57	94.08	94.91	1.00
	20 mmol·L-1	93.76	93.30	94.22	92.95	93.45	94.85	1.00
	40 mmol·L-1	93.84	93.89	94.13	91.94	93.88	93.34	1.00
	60 mmol·L-1	93.78	93.58	93.24	94.10	0.00	0.00	0.67
	80 mmol·L-1	92.31	93.10	92.70	92.98	0.00	0.00	0.66
	100 mmol·L-1	91.50	92.52	92.63	85.66	0.00	0.00	0.65
	平均 Mean	92.82	93.19	93.29	92.03	46.90	47.18	

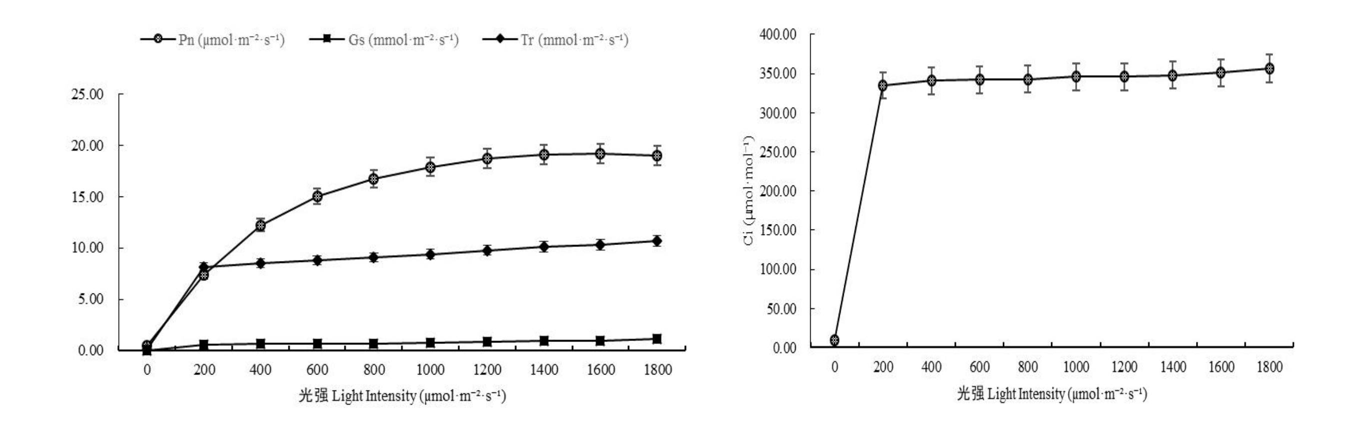
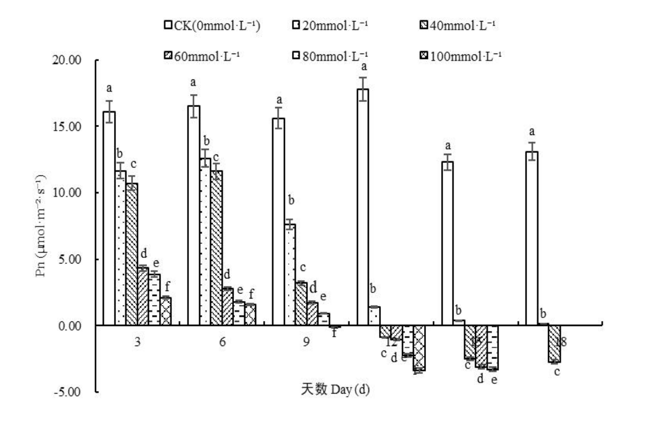
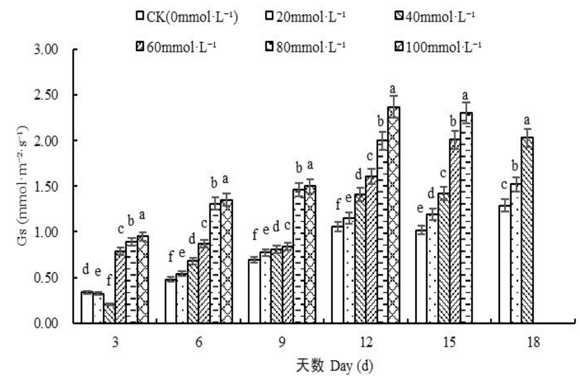


图 1 不同光强下 CK 的 Pn、Ci、Tr 和 Gs 的变化

Fig.1 Changes of Pn, Ci, Tr and Gs of CK under different light intensities





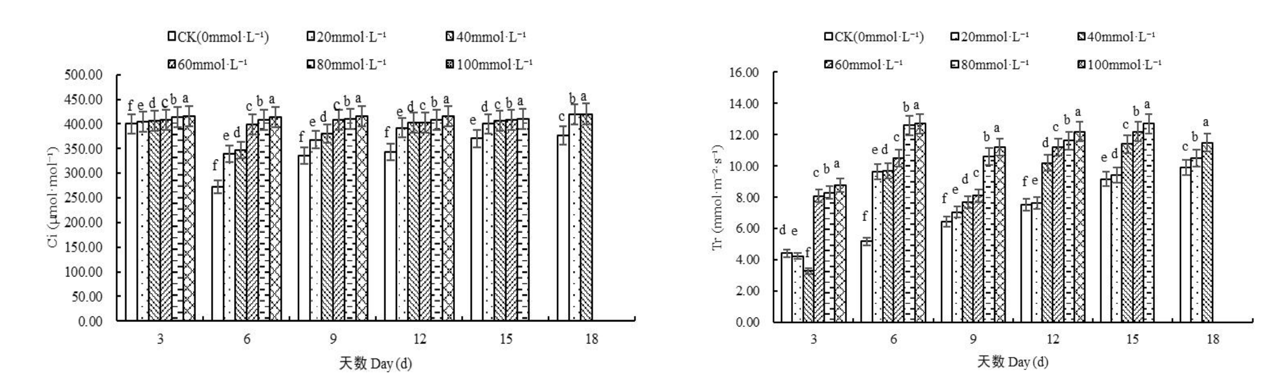


图 2 NaHCO$_3$ 胁迫对 Pn、Ci、Tr 和 Gs 的影响

Fig.2　Effects of NaHCO$_3$ stress on Pn, Ci, Tr and Gs under different light intensities

2.4 NaHCO$_3$ 胁迫下水溶液 pH 值的变化

由图 3 可知，与 CK 相比，不同 NaHCO$_3$ 胁迫浓度下的水溶液 pH 值均大幅增加且随着试验时间的推移大致呈线性增长的趋势，其中，20 mmol・L^{-1} 浓度下的水溶液 pH 值最为平缓，表明此浓度下，紫根水葫芦吸收 NaHCO$_3$ 显著，改善了水体 pH 值。

chinaXiv:202003.00017v1

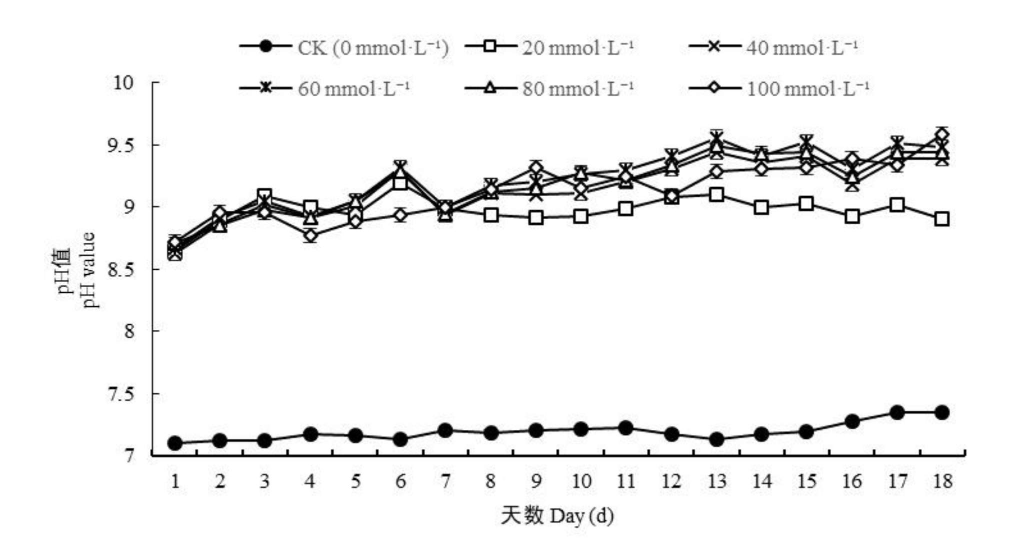


图 3 NaHCO$_3$ 胁迫下水溶液 pH 值的变化

Fig.6　Change of pH value of aqueous solution under NaHCO$_3$ stress

2.5 NaHCO$_3$ 胁迫下紫根水葫芦的生长变化

选取最能直观表现出 NaHCO$_3$ 胁迫下紫根水葫芦生长变化的第 9 天和第 18 天的单株照片对比，可以从图 4 和图 5 中看出，随着 NaHCO$_3$ 浓度的升高，紫根水葫芦的形态产生明显变化，叶片逐渐稀疏干枯脱落，根量逐渐减少。

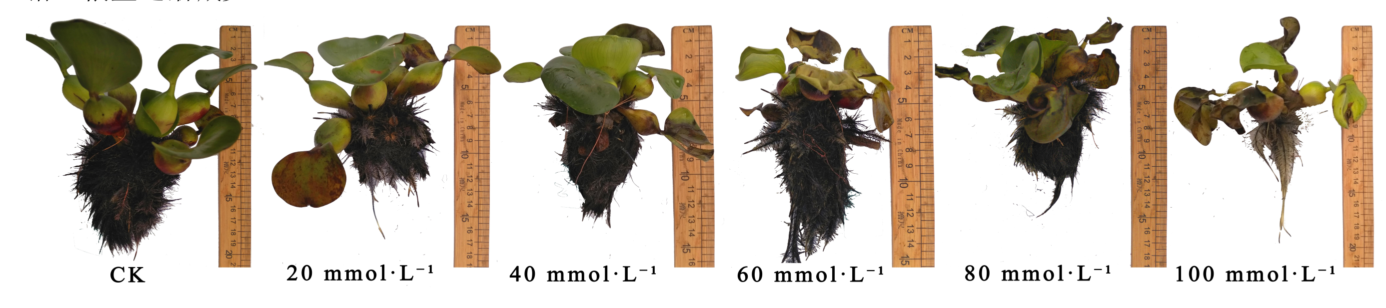


图 4 NaHCO$_3$ 胁迫下紫根水葫芦第 9 天的生长变化

Fig.4　Growth changes of purple root *Eichhornia crassipes* on the 9th day under NaHCO$_3$ stress

chinaXiv:202003.00017v1

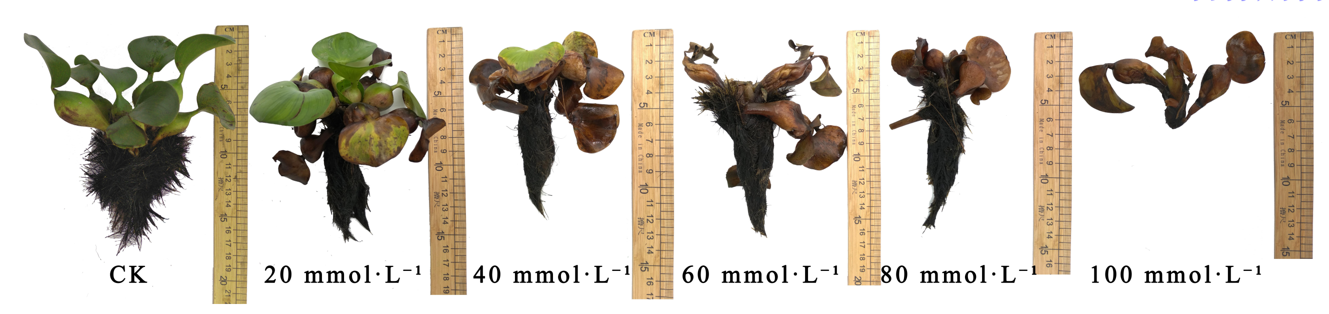


图 5 $NaHCO_3$ 胁迫下紫根水葫芦第 18 天的生长变化

Fig.5 Growth changes of purple root *Eichhornia crassipes* on the 18th day under $NaHCO_3$ stress

3 讨论与结论

3.1 $NaHCO_3$ 胁迫下紫根水葫芦形态学指标的变化

逆境胁迫抑制叶绿素合成，降低光合速率，使同化物与能量供给减小，从而影响植物的正常生长发育（王智明等，2014）。故此，在评价植物抗逆能力的研究中，生长状况和形态表型是最直观的表现，高逆境环境对植物的毒害可以从植物生长量减少和存活率的降低得到验证（WANG L, et al., 2013）。本研究发现，在 $NaHCO_3$ 浓度低时(≤40 mmol • L^{-1})，相比 CK，紫根水葫芦的株高、根长、根冠比和含水量等指标呈现增长或无显著影响情况，而在高 $NaHCO_3$ 浓度时(≥60 mmol • L^{-1})，随着 $NaHCO_3$ 浓度的升高，紫根水葫芦的株高、根长、根冠比和含水量显著降低，与 $NaHCO_3$ 浓度呈负相关关系，这与于崧等（2018）研究 $NaHCO_3$ 胁迫对芸豆幼苗的生长和马彦君等(2018)研究盐胁迫对蒙古黄芪种子萌发与幼苗生长的结论相一致。同时，随着处理时间的持续，紫根水葫芦的株高、根长、根冠比和含水量在试验开始的第 12 天以后均大幅度下降，表明随着胁迫时间的累积，低浓度的 $NaHCO_3$ 胁迫同样可以达到高浓度胁迫的伤害值。

3.2 $NaHCO_3$ 对紫根水葫芦光合参数的影响

紫根水葫芦作为近年新兴的一种优良水生态环境修复植物受到了诸多关注，但将其强大的净化水质能力和适应性应用于改善修复盐碱水质等方面鲜有报道。本研究以紫根水葫芦植株作为研究对象，对 $NaHCO_3$ 胁迫下其光合参数的变化进行了研究，探究其在不同处理下随着处理时间的延长对 $NaHCO_3$ 胁迫的生态适应机制。

碱胁迫对植物造成的危害主要是渗透胁迫，进而导致植物的光合作用受到抑制（周珩等，2014）。本研究发现，Pn 是反应植物对胁迫响应及鉴定植物抗逆性的有效指标（卢闯等，2017）。随着 $NaHCO_3$ 浓度的增加及处理时间的延长，紫根水葫芦的 Pn 呈持续下降的趋势，Ci、Tr 和 Gs 整体呈上升趋势，这与于崧等[16]研究的随着盐碱胁迫浓度的不断增加，芸豆叶片叶绿素含量、净光合速率(Pn)总体上呈不断下降趋势，胞间 CO_2 浓度(Ci)呈不断升高趋势结论一致。许大全(1997)强调指出 Ci 降低是判定光合作用受气孔限制的不可或缺的条件，而 Ci 增加则是光合作用非气孔限制的最可靠的判据。表明本试验中紫根水葫芦的光合作用主要受到的是非气孔限制。

3.3 结论

本研究表明，紫根水葫芦能改善低碱浓度下的水体 pH 值，其光合作用主要受到的是非气孔限制，紫根水葫芦能安全适应生存在不超过 40 mmol • L^{-1} 碱浓度的水溶液中。同时发现，本次实验浓度设置跨度较大，尤其在 40-60 mmol • L^{-1} $NaHCO_3$ 浓度之间，而且试验期较短，后续研究可以更深入，包括对其进行不同浓度阶段的复水试验。

参考文献

CHAI MW, 2013. Ecological responses of exotic species *Spartina alterniflora* and *Flaveria bidentis* to heavy metals and saline-alkali stress [D]. Tianjin: Nankai University. [柴民伟，2013. 外来种互花米草和黄顶菊对重金属和盐碱胁迫的生态响应 [D]. 天津：南开大学.]

CHEN WP, XU SY, NA ZY, et al., 2016. Purification of heavy metal water by purple root *Eichhornia crassipes* [J]. J Environ Eng, 10(5): 2284-2290. [陈文萍，徐舒阳，那中元，等，2016. 紫根水葫芦对重金属水体的净化作用 [J]. 环境工程学报，10(5): 2284-2290.]

CHEN S, 2018. Research on Purification of Domestic Sewage by *Eichhornia crassipes* in Static Mode [A].

ChinaXiv合作期刊

Editorial Board of Environmental Engineering, Industrial Architecture Magazine Co., Ltd. Proceedings of Environmental Engineering 2018 National Academic Annual Conference (Volume 1) [C]. Environmental Engineering Editorial Board, Industrial Construction Magazine Co., Ltd.: Editorial Department of Environmental Engineering. [陈松，2018. 静态模式下水葫芦净化生活污水研究 [A]. 《环境工程》编委会、工业建筑杂志社有限公司. 《环境工程》2018 年全国学术年会论文集(上册) [C].《环境工程》编委会、工业建筑杂志社有限公司: 《环境工程》编辑部.]

HAN JL, GUAN XK, CUI JY, et al., 2019. Effects of continuous drought re-watering on the compensation ability of different genotypes of *Zea mays* roots and shoots [J]. Acta Agric Boreal-Sin, 34(01): 140-147. [韩静丽，关小康，崔静宇，等，2019. 连续干旱复水对不同基因型玉米苗期根冠补偿能力的影响 [J]. 华北农学报，34(01): 140-147.]

HUANG HQ, 2015. Comparative study on nutrient composition and antioxidant capacity of Purple root *Eichhornia crassipes* and common *Eichhornia crassipes* [D]. Guangzhou: Jinan University. [黄汗青，2015. 紫根水葫芦与普通水葫芦营养成分及抗氧化能力的比较研究 [D]. 广州: 暨南大学.]

LI Y, WANG YB, 2010. Study on Absorption and Tolerance of Cu to 4 Species of Fern Herbs [J]. Acta Pratacult Sin, 19(3): 191-197. [李影，王友保，2010. 4 种蕨类草本植物对 Cu 的吸收和耐性研究 [J]. 草业学报，19(3): 191-197.]

LU C, FENG HC, ZHAO CH, et al., 2017. Effect of phosphorus on leaf net photosynthesis, protective enzyme activity and nutrient uptake of *Zea mays* at seedling stage in fluvo-aquic soils under water stress [J]. Chin J Eco-Agric, 25(2): 239-246. [卢闯，逄焕成，赵长海，等，2017. 水分胁迫下施磷对潮土玉米苗期叶片光合速率、保护酶及植株养分含量的影响 [J]. 中国生态农业学报，25(2): 239-246.]

LU XY, 2016. Resource research of purple root *Eichhornia crassipes* under sub/supercritical water conditions [D]. Kunming University of Science and Technology. [卢秀云，2016. 紫根水葫芦在亚/超临界水条件下的资源化研究 [D]. 昆明理工大学.]

MA YJ, NI Q, YANG YY, LU Y, MA R, 2018. Effects of salt stress on seed germination and seedling growth of *Astragalus mongholicus* Bunge [J]. Bull Soil Water Conserv, 38(03): 106-111. [马彦军，倪强，杨永义，等，2018. 盐胁迫对蒙古黄芪种子萌发与幼苗生长的影响 [J]. 水土保持通报，38(03): 106-111.]

2009. Purple root *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms [J]. Urban Rural Prosper, (11): 55. [2009. 紫根水葫芦 [J]. 城乡致富，(11): 55.]

SHI W, 2011. Isolation and screening of bacteria in extreme saline-alkali soils and their salt resistance [D]. Harbin: Northeast Forestry University. [石伟，2011. 极端盐碱土壤细菌的分离筛选及抗盐特性研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学.]

Sunil Mehta, et al., 2000. Controls on the regional-scale salinizatian of the Ogallala aquifer, Southern High plains, Texas, USA [J]. Appl Geochem, (15): 849-864.

SUN YS, XING BY, YANG G, LIU GF, 2017. Effects of $NaHCO_3$ stress on growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of transgenic TaLEA genes in *Populus davidiana*×*P. bolleana* [J]. J Beijing Fore Univ, 39(10): 33-41. [孙延爽，邢宝月，杨光，等，2017. $NaHCO_3$ 胁迫对转 TaLEA 基因山新杨生长及光合、叶绿素荧光特性的影响 [J]. 北京林业大学学报，39(10): 33-41.]

WANG L, ZHANG JL, WANG D, et al., 2013. Assessment of salt tolerance in transgenic potato carrying AtNHX1 gene [J]. Crop Science, 53(6): 2643-2651.

WANG ZM, ZHANG FJ, XU X, 2014. Advances on physiological and biochemical indexes of salt tolerance in plant [J]. Hubei Agric Sci, 53(7): 1493-1496. [王智明，张峰举，许兴，2014. 植物耐盐生理生化指标研究进展 [J]. 湖北农业科学，53(7): 1493-1496.]

WU MT·ASJ, MA MT·SWT, MA CX, 2019. Hyperspectral estimation of water content in *Triticum aestivum* L. leaves based on fractional differential and SPA-BP neural network [J]. Las Optoelect Prog, 56(15): 251-259. [吾木提・艾山江，买买提・沙吾提，马春玥，2019. 基于分数阶微分和连续投影算法-反向传播神经网络的小麦叶片含水量高光谱估算 [J]. 激光与光电子学进展，56(15): 251-259.]

WU YC, 2012. Salt content of saline soil in Songliao Plain based on environmental satellite [D]. Changchun: Jilin University. [吴阳春，2012. 基于环境卫星的松辽平原盐渍土盐分含量研究 [D]. 长春: 吉林大学.]

XIE ZY, YANG GS, 2003. Advances in salt tolerance of forage plants [J]. Pratacult Sci, 20(8): 11-15. [谢振宇，杨

chinaXiv:202003.00017v1

ChinaXiv合作期刊

光穗，2003. 牧草耐盐性研究进展 [J]. 草业科学，20(8): 11-15.]

XU DQ, 1997. Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis [J]. Plant Physiol Comm, 33(4): 241-244. [许大全，1997. 光合作用气孔限制分析中的一些问题 [J]. 植物生理学通讯，33(4): 241-244.]

XU YZ, 2008. Study on the water and salt transport law of saline soils with different salt supply types in Songnen Plain [D]. Changchun: Northeast Normal University. [许艳争，2008. 松嫩平原不同盐分补给类型盐渍土的水盐运移规律研究 [D]. 长春: 东北师范大学.]

YU W, ZHENG LN, LI X, CHEN XY, SONG YF, YU LH, 2018. Effects of NaCl and $NaHCO_3$ stress on growth and photosynthetic characteristics of *Phaseolus vulgaris* seedlings [J]. Nor Hortic, (23): 1-8. [于崧，郑丽娜，李欣，等，2018. NaCl 和 $NaHCO_3$ 胁迫对芸豆幼苗生长及光合特性的影响 [J]. 北方园艺，(23): 1-8.]

ZHANG GX, DENG W, He Y, 2005. Isotopic Evidence of Water Salinization Mechanism in the Western Songnen Plain[J]. Hydrogeol Eng Geol, (03): 55-58.[章光新，邓伟，何岩，2005. 松嫩平原西部水体环境盐化机制的同位素证据 [J]. 水文地质工程地质，(03): 55-58.]

ZHAN JH, LI Q, DENG S, CAI Q, ZHAO SM, PAN XJ, 2014. Study on the purification effect of purple root *Eichhornia crassipes* on nitrogen and phosphorus in eutrophic water [J]. Earth Environ, 3: 389-397. [展巨宏，李强，邓莎，等，2014. 紫根水葫芦对富营养化水体中氮磷的净化效果研究 [J]. 地球与环境，3: 389-397.]

ZHOU Y, GUO SR, SHAO HJ, et al., 2014. Effects of iso-osmotic $Ca(NO_3)_2$ and NaCl stress on growth and physiological characteristics of cucumber seedlings [J]. Acta Ecol Sin, 34(7): 1880-1890. [周珩，郭世荣，邵慧娟，等，2014. 等渗 NaCl 和 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫对黄瓜幼苗生长和生理特性的影响 [J]. 生态学报，34(7): 1880-1890.]

chinaXiv:202003.00017v1